

一种双维度上的导频复用方法及其性能分析

高 翟¹ 朱 旭² 吴让仲¹

(1. 中国地质大学机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

2. 利物浦大学电气与电子工程学院, 英国 利物浦 L69 3BX)

摘要 针对蜂窝系统中导频稀缺和边缘用户性能不足的问题, 提出了合理提升导频利用率的方法, 该方法通过在不同的环区内设计各自的导频复用程度来实现。有别于传统的扇区划分, 以基站与用户终端的距离为指标划分出若干环区, 使小区中心用户与边缘用户有明晰的区隔。一方面利用高复用因子提高小区中心区域的导频利用率, 另一方面利用低复用因子保证边缘用户的通信质量。环区划分所对应的导频微观复用是以小区为单位的宏观复用的补充, 两种复用模式结合成双维度导频复用, 使导频复用程度的调节更精细, 易于实现用户容量与用户体验的平衡。仿真结果验证了上述优势, 并显示出在导频资源受限的条件下, 双维度导频复用在增大用户承载量的同时能降低来自邻近小区的导频污染。

关键词 导频复用; 宏观维度; 微观维度; 复用因子; 环区; 用户容量

中图分类号 TN92 文献标志码 A 文章编号

New mode of reusing pilot by two dimensions with its analysis on performance

GAO Di¹ ZHU Xu² WU Rangzhong¹

(1. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Department of Electrical Engineering and Electronics, University of Liverpool, Liverpool L69 3BX, United Kingdom)

Abstract In the case of scarcity on pilot resource and low performance on edge users, a scheme to properly raise the efficiency of pilots was proposed, which was realized by setting distinct degrees of pilot reuse in different rings. Unlike traditional sectors, rings in cells here were based on the distance between base station and corresponding terminals, where users were carefully separated to central areas and edge areas. Greater reuse factors were used to increase the degree of pilot reuse, and on the other hand, smaller reuse factors were utilized to guarantee the transmission quality of edge users. The micro-dimension pilot reuse, extended from division by rings, plays a supplementary role of macro-dimension pilot reuse with the unit of a whole cell. The combination of those two dimensions refines the adjustment on the extent of pilot reuse, which offers more convenience in achieving the balance between system capacity and users' performance. Simulation here verifies the advantages above, and it also indicates the effect of two-dimension reuse on decreasing pilot contamination while the quantity of users grows under limited pilot resource.

Key words pilot reuse; macro-dimension; micro-dimension; reuse factor; ring; user capacity

导频复用的概念伴随着蜂窝网的普及而产生, 它的目的是将极其有限的导频资源分配给迅速膨胀的用户群。在上世纪末蜂窝网建设初期, 复用基本采取区群模式^[1-2], 也就是在特定方向上每隔一定距离将一个小区的导频资源“重现”于另一个小区中,

这种“重现”以小区为最小单元^[3], 属于空间大尺度复用范畴。而用户量增至一定程度时, 这种大尺度复用已不能满足系统承载, 故而出现了小区内复用因子不再统一的情形, 用户按照一定规则被划分为若干类, 每一类对应一种复用因子^[3]。不过, 与

收稿日期 2019-10-10.

作者简介 高 翟(1983-), 男, 博士, E-mail: gd@cug.edu.cn.

基金项目 国家留学基金管理委员会资助项目(201506415036); 湖北省自然科学基金资助项目(2017CFC870).

其它资源不同, 复用因子不适合以三扇区方式进行切割, 因为存在两个弊端: 一是扇区数目的固定导致应对用户量波动的能力不高; 二是和全小区相比, 一个扇区内用户与小区基站(或小区边缘)的距离差异几乎不变, 这就直接导致通信质量差异仍然巨大, 不适合统一复用因子. 为了避开这一问题, 本文将小区以距离为关键参数对小区的覆盖区域进行划分, 这样每个区域呈圆环状^[4], 区域内的点到小区基站或小区边缘的距离大致相当, 便于分配一致的复用因子. 这种导频分配的尺度已然远小于小区量级, 属于空间小尺度复用范畴.

空间上的大尺度复用和小尺度复用是从两个不同的方面分配导频资源, 他们之间互不冲突. 由于这样的特性, 本文把大尺度复用称为宏观复用, 对应的变化空间称作宏观维度; 把小尺度复用称为微观复用, 对应的变化空间称作微观维度. 微观复用打破小区内部复用因子的一致性, 将中心区域与边缘区域差别对待. 一般为了保证边缘用户的信干比, 小区边缘区域的复用程度比中心区域低. 宏观维度和微观维度可结合成双维度, 对应的复用模式称为宏微观双维综合复用(简称综合复用), 对应的变化空间是双维度.

本文内容大致按照从简单到复杂, 从单维度到双维度的思路展开. 首先对宏观和微观的单维度复用模式进行阐述并分析性能; 然后将宏观维度和微观维度结合, 提出综合复用机制, 并将它与单维度复用模式进行比较; 最后通过仿真验证综合复用机制的性能优势, 为进一步研究提供可行的方向.

1 规则宏小区的导频复用优化

1.1 宏观复用及其异步法

宏观复用的调节位于宏观维度上, 以区群为对象. 区群越大(包含的小区数越多)则支持的用户量越小, 区群越小(包含的小区数越少)则导频受到的干扰程度越高^[5]. 根据传统六边形小区的排列特征, 若要求相邻(接壤)小区不复用导频, 则区群应至少包含 3 个小区, 如图 1(a)所示. 这类 3 小区区群设计每个小区的导频复用因子为 3, 支持的用户数达到导频资源数的 $1/3$; 但同导频小区间距小, 导频污染较严重. 如果用户数减少, 可以通过调节导频因子来降低导频污染. 但当所有小区的导频因子同步变化时, 资源更改的代价很高, 包括调整时间延长, 信令复杂度提高, 瞬时容量抖动加剧等诸多方面.

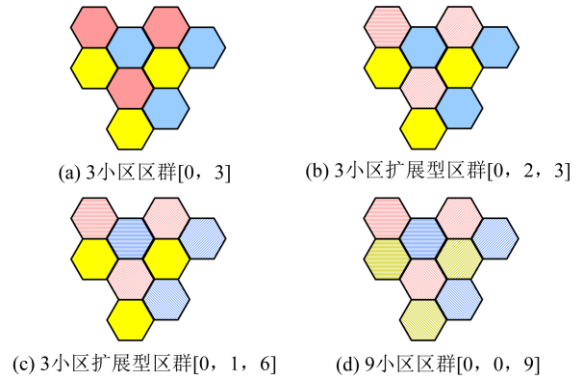


图1 区群规模从3增至9的蜂窝图示(图中颜色和纹理均用于区分导频资源)

例如, 在小区规模不变时, 公共复用因子从 $1/3$ 降至 $1/4$ 意味着每个小区中至少有 25% 的导频需要同步重新分配; 从 $1/4$ 降至 $1/7$ 时, 该占比升至 42.9%^[6]. 而采用同导频区分步调整复用因子的方法(简称异步法)^[7], 则任一时刻同步重分配导频的比例大幅降低, 如图 1(b)~(d)所示. 前文所述的两种情形在应用异步法后, 每一步分别有至少 66.7% 和 75% 的小区导频资源不作调整^[6], 大大降低了空间分集和多小区协同通信的复杂度.

1.2 微观复用的基本思想

微观复用为小区内部的导频重组而引入, 它的调节面向一个小区内的不同位置, 属于微观维度. 该维度存在的基础是在同一复用因子下, 小区靠近归属基站的用户(中心用户)和远离归属基站的用户(边缘用户)在通信质量方面有显著差别. 这一思路打破了宏观复用里单小区内复用状态整齐划一的约束, 使同一小区的不同用户应用不同的复用因子成为可能. 为了简化问题, 本研究假设小区内的传输环境基本均匀, 并且暂不考虑波束成形对干扰的规避作用. 如此一来, 中心用户和边缘用户所在区域的分界线大致是以归属基站为圆心的若干同心圆, 小区内应用各复用因子的区域以此类圆为分界线, 如图 2 所示.

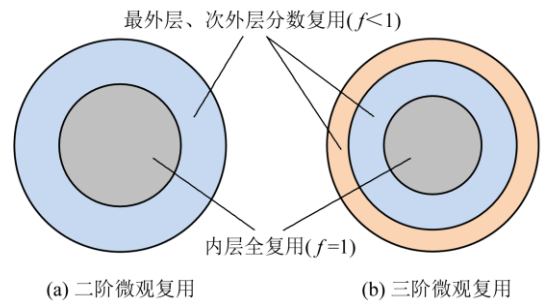


图2 小区内按复用因子的区域划分(f 为复用因子)

2 宏观和微观维度上的复用分析

2.1 宏观维度分析

经典的蜂窝无线通信服务区由若干形状相同、面积相等的区群构成，单个区群内分属不同小区的用户不存在复用导频的情况。区群的规模有特定的值域。

定理 1 设每个区群由 N 个小区组成，则 N 的值域为^[3]

$$\mathfrak{R}_N = \{N | N = n^2, n \in \mathbb{N}\} \cup \{N | N = p^2 + pq + q^2, p \in \mathbb{N}, q \in \mathbb{N}\}$$

由该定理可知，为保证使用相同导频的小区(以下简称同导小区)的分布规则化， N 的值域并不是全体自然数集。容易看出，3 的任意整次幂值都满足区群规模，因此整个服务区各类复用因子的变化过程可用一个变化的三叉树来表示。为后文表述方便，这里先针对三叉树给出一些定义和性质。

定义 1 一棵层数为 L (L 为自然数) 且有

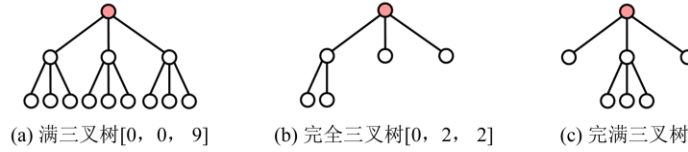


图3 三类特殊的三叉树

有了这三个定义，全局复用因子的组合状态就能对应一个特殊的三叉树 T ，它既是完全三叉树，也是完满三叉树(但不一定是满三叉树)。三叉树的每一层对应一个导频复用因子，任一层的复用因子是其上一层的 $1/3$ 。每一个节点的导频资源取自其父节点，同层节点之间不共享任何导频；每个小区的导频资源均有一个叶节点与之对应，叶节点之间也不共享任何导频。完全三叉树的叶节点最多分布在最深的相邻两层，这意味着同一时刻至多存在 3 倍之差的两种复用因子，如图 1 所示。很明显，这种方法每一步资源调整的更改代价降低，且调节精细度升高。它不会引发所有小区同时更改复用因子的情况，大幅降低了中断概率。

现在来分析一下三叉树 T 一层内的扩展情况，设 T 的纵向从层 0 至层 L ，总计层数为 $L+1$ ，则第 l 层节点数最多为 3^l 。由于 T 是完满三叉树，层 L 的节点数 $a_L(i) = 3i$ ($i = 1, 2, \dots, 3^{L-1}$)。又因为 T 是完全三叉树，所以除层 L 外其余各层的节点数为 $b(l) = 3^l$ ($l = 0, 1, \dots, L-1$)，扩展在层 L 内进行。

当 $a_L = 3$ 时，全树的叶节点数为 $3^{L-1} + 2$ ；由此

$(3^L - 1)/2$ 个节点的三叉树称为满三叉树(perfect ternary tree)，如图 3(a)。

定义 2 如果一颗三叉树的每一个节点编号都与相同深度的满三叉树节点编号相等，则称该三叉树为完全三叉树，如图 3(b)。

根据定义 2，容易得出以下性质——

性质 1 如果以一个数组来表示一棵树，数组的长度对应树的总层数，数组中某一元素的位置对应树中相应的层，该元素的值对应该层中的叶节点数目，则任何一颗完全三叉树都有唯一的数组与之对应；反之，对应一颗完全三叉树的数组不可能表示另一颗异构的完全三叉树。

该性质阐明了“数”(数组)“形”(完全三叉树)对应的唯一性；这样面对一颗完全三叉树，数组就能够替代连通图表达一颗完全三叉树的结构。本文定义此类数组为导频复用状态数组(简称复用状态数组)。文中用方括号组织的数组皆为复用状态数组。

定义 3 所有节点的度均为 0 或 3 的三叉树称为完满三叉树，如图 3(c)所示。

推广，对于 $a_L = 3i$ ，全树的叶节点数为 $3^{L-1} + 2i$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, 3^{L-1}$ 。

假设小区总数为 3^L ，每小区半径为 R ，包含均匀分布的 U 个用户，依照完全三叉树的特性，叶节点的位置限制于最下两层(即层 $L-1$ 和层 L)，对应表示任何小区的复用因子在某一时刻最多有两类值。其中 $3i$ 个小区的复用因子为 3^{-L} ，则所需导频数

$$F_1(i, U) = 3iU \cdot 3^{-L} = 3^{1-L}iU \quad (1)$$

其余 $3^L - 3i$ 个小区是 3^{1-L} 复用，所需导频数

$$F_2(i, U) = (3^L - 3i)U \cdot 3^{1-L} = 3U - 3^{2-L}iU \quad (2)$$

由式(1)(2)得总导频数

$$F(i, U) = F_1(i, U) + F_2(i, U) = 3U - 2 \cdot 3^{1-L}iU$$

换言之，如果导频数固定为 F_0 ，则支持用户数为

$$U_m = \frac{F_0}{F(i, U)}U = \frac{F_0}{3U - 2 \cdot 3^{1-L}iU}U = \frac{F_0}{3 - 2 \cdot 3^{1-L}i}$$

容易证明，无论叶节点位于层 $L-1$ 或层 L ，都有区群 $N_k = 3^k$ ，同频复用距离 $d_k = 3^{(k+1)/2}R$ ，其中 $k = L-1$ 或 L 。

在多用户蜂窝网中，上行通信质量通常低于下行通信质量，故在此针对上行通信来作分析，其通

信质量的代表性指标信干噪比为^[8]

$$R_{\text{SIN}} \approx \beta_{\text{in}}^2 / \sum \beta_{\text{out}}^2 \quad (3)$$

式中 β_{in} 和 β_{out} 均为基站和特定用户间的大尺度衰落系数, 前者对应同小区内的目标用户, 后者对应其它小区的干扰用户. 设小区内任一用户与本小区基站相距 D_{in} , 与最近的同频复用基站相距 D_{out} , 则有 $\beta_{\text{in}} = z_{\text{in}} / D_{\text{in}}^\gamma$, $\beta_{\text{out}} = z_{\text{out}} / D_{\text{out}}^\gamma$. 其中的 γ 是路径损耗指数, 它的经验值随环境变化而不同. 例如, 室内无遮挡环境下 $\gamma \in (1.6, 1.8)$, 自由空间里 $\gamma=2.0$, 城区内一般有 $\gamma \in (2.6, 3.5)$, 高楼阻断路径下则有 $\gamma \in (4.0, 6.0)$. z_{in} 为对应小区内目标用户的阴影衰落因子, z_{out} 为小区外干扰用户的阴影衰落因子, 它们服从对数正态分布. 本文将该分布简化为均值等于零, 标准差等于 σ_s 的情况, 则对应的概率密度函数变为

$$p(z) = \frac{1}{z\sigma_s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln z)^2}{2\sigma_s^2}} \quad z \in \mathbb{R}^+$$

其中 z 是 z_{in} 或 z_{out} 之一.

通过式(3)获得信干噪比后, 还可求出上行最大传输速率 $C = (1-\mu)E[\log_2(1+\text{SINR})]$, 其中 $\mu \in (0, 1)$ 表示导频传输引发的频谱效率的衰减度.

2.2 微观维度分析

微观维度上的导频复用对单小区内的用户进行区分, 复用因子由中心向边缘递减. 如果每个小区中存在两种复用因子, 则称此复用模式为二阶微观复用, 如图 2(a)所示. 假设小区内边界将小区平均划分为面积相等的若干部分, 那么显然二阶微观复用的内边界半径为 $r_2 = R/\sqrt{2}$.

类似地, 如果每个小区中存在三种复用因子,

则此复用技术为三阶微观复用, 如图 2(b)所示. 对三阶微观复用而言, 存在两个同心的内边界, 其半径分别为 $r_{3,1} = R/\sqrt{3}$, $r_{3,2} = \sqrt{2}R/\sqrt{3}$. 显然, 在满足小区边缘用户通信指标的前提下, 由于有内层高复用区域的存在, 微观复用比宏观复用支持的用户更多; 这也就意味着在用户量一定时, 通过合理地设置复用因子, 微观复用的小区边缘用户能获得更高的通信质量.

3 宏观复用和微观复用的结合

如果蜂窝小区足够多, 覆盖的平面区域足够大, 那么对于指定小区而言, 总是存在 6 个与它距离最近的同导小区, 它们均匀分布在指定小区为圆心, 半径为 d_N 的圆周上; 再往外, 圆周半径增至 $\sqrt{3}d_N$ 和 $2d_N$ 时, 又会在圆周上出现均匀分布的同导小区. 该距离越远, 导频污染越可以忽略不计; 所以本研究只取最近的 6 个同导小区来分析. 对于本小区中的某一用户, 由式(3)可得其信干噪比

$$R_{\text{SIN}} \approx \frac{\beta_{\text{in}}^2}{\beta_{\text{out},1}^2 + \beta_{\text{out},2}^2 + \beta_{\text{out},3}^2 + \beta_{\text{out},4}^2 + \beta_{\text{out},5}^2 + \beta_{\text{out},6}^2}$$

借助微观维度的思想, 宏观和微观的复用结合将单个小区划分为同心且等面积的若干层.

3.1 二、三层小区的复用状态

小区以二层划分时, 内层复用因子为 1, 外层复用因子为 1/3 或 1/9 并以宏观维度扩展. 复用因子影响着小区内用户容量和导频需求间的对应关系. 为了清晰地描述复用因子的影响效果, 这里将可用导频数限定为 F , 表 1 中的前 5 行是三叉树层

表 1 二层小区导频复用状态与用户容量

复用状态	全复用 占比/%	全复用 支持用户	1/3 复用 占比	1/3 复用 支持用户	1/9 复用 占比/%	1/9 复用 支持用户	1/27 复用 占比/%	1/27 复用 支持用户	支持用户 总量
[1]	100	F	0	0	0	0	0	0	F
[0, 3]	25.0	$F/4$	75.0%	$F/4$	0	0	0	0	$F/2$
[0, 2, 3]	16.7	$F/6$	33.3%	$F/9$	50.0	$F/18$	0	0	$F/3$
[0, 1, 6]	12.5	$F/8$	12.5%	$F/24$	75.0	$F/12$	0	0	$F/4$
[0, 0, 9]	10.0	$F/10$	0	0	90.0	$F/10$	0	0	$F/5$
[0, 0, 8, 3]	8.33	$F/12$	0	0	66.7	$2F/27$	25.0	$F/108$	$F/6$
[0, 0, 7, 6]	7.14	$F/14$	0	0	50.0	$F/18$	42.9	$F/63$	$F/7$
[0, 0, 6, 9]	6.25	$F/16$	0	0	37.5	$F/24$	56.3	$F/48$	$F/8$
[0, 0, 5, 12]	5.56	$F/18$	0	0	27.8	$5F/162$	66.7	$2F/81$	$F/9$
[0, 0, 4, 15]	5.00	$F/20$	0	0	20.0	$F/45$	75.0	$F/36$	$F/10$
[0, 0, 3, 18]	4.54	$F/22$	0	0	13.6	$F/66$	81.8	$F/33$	$F/11$
[0, 0, 2, 21]	4.17	$F/24$	0	0	8.33	$F/108$	87.5	$7F/216$	$F/12$
[0, 0, 1, 24]	3.85	$F/26$	0	0	3.85	$F/234$	92.3	$4F/117$	$F/13$
[0, 0, 0, 27]	3.57	$F/28$	0	0	0	0	96.4	$F/28$	$F/14$

数不超过 3 的情形. 若进一步允许树的层数增至 4, 则可继续扩展出表 1 中从第 6 行至第 14 行的部分.

如果每小区被分为三层, 按照微观复用的思想, 最内层全复用, 次内层 1/3 复用, 外层 1/9 或 1/27

复用并以宏观维度扩展, 对应的状态数组有 10 种情形(对应表 2 第一列). 同样限定总导频数为 F , 这 10 种情形对用户的支持情况见表 2.

表 2 三层小区导频复用状态与用户容量

复用状态	全复用 占比	全复用 支持用户	1/3 复用 占比	1/3 复用 支持用户	1/9 复用 占比	1/9 复用 支持用户	1/27 复用 占比	1/27 复用 支持用户	支持用户 总量
[0, 0, 9]	1/13	$F/13$	3/13	$F/13$	9/13	$F/13$	0	0	$3F/13$
[0, 0, 8, 3]	1/15	$F/15$	1/5	$F/15$	8/15	$8F/135$	1/5	$F/135$	$F/5$
[0, 0, 7, 6]	1/17	$F/17$	3/17	$F/17$	7/17	$7F/153$	6/17	$2F/153$	$3F/17$
[0, 0, 6, 9]	1/19	$F/19$	3/19	$F/19$	6/19	$2F/57$	9/19	$F/57$	$3F/19$
[0, 0, 5, 12]	1/21	$F/21$	1/7	$F/21$	5/21	$5F/189$	4/7	$4F/189$	$F/7$
[0, 0, 4, 15]	1/23	$F/23$	3/23	$F/23$	4/23	$4F/207$	15/23	$5F/207$	$3F/23$
[0, 0, 3, 18]	1/25	$F/25$	3/25	$F/25$	3/25	$F/75$	18/25	$2F/75$	$3F/25$
[0, 0, 2, 21]	1/27	$F/27$	1/9	$F/27$	2/27	$2F/243$	7/9	$7F/243$	$F/9$
[0, 0, 1, 24]	1/29	$F/29$	3/29	$F/29$	1/29	$F/261$	24/29	$8F/261$	$3F/29$
[0, 0, 0, 27]	1/31	$F/31$	3/31	$F/31$	0	0	27/31	$F/31$	$3F/31$

3.2 平均功率与信干噪比

设基站全向天线发射功率为 Q . 在传输介质为空气时, 信号功率大约与传播距离的二次方成反比, 距基站 D 处的接收功率可视为 $Q_r = (Q/4\pi D^2) \propto (1/D^2)$. 小区内各复用因子应用于特定的环形区域内, 则对应区域内用户的平均接收功率为

$$\bar{S} = \frac{\int_{\Delta D} Q_r C_D dD}{\Delta S} = \frac{\int_{r_{in}}^{r_{out}} \frac{Q}{4\pi D^2} 2\pi D dD}{\pi r_{out}^2 - \pi r_{in}^2} = \frac{Q \ln \frac{r_{out}}{r_{in}}}{2\pi(r_{out}^2 - r_{in}^2)} \quad (4)$$

式(4)中 C_D 表示半径为 D 的圆周长, ΔS 表示环形区域面积, r_{in} 和 r_{out} 分别为环形的内、外半径.

另一方面, 令本小区被干扰用户和最近的 6 个同导小区基站的距离分别为 $d_{B,1}$, $d_{B,2}$, \dots , $d_{B,6}$, 则

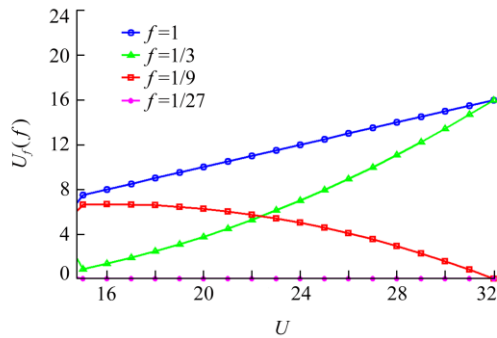


图 4 各复用因子 f 分配的用户数(导频数 64)
同导小区带来的平均干扰功率为

$$\bar{I}_B = \sum_{i=1}^6 \frac{Q}{4\pi d_{B,i}^2} \quad (5)$$

该干扰功率对导频性能有直接影响, 它和本小区目标导频之间的功率比值 R_{IS} 称为同导小区污染度. 它通常以 dB 为单位, 计算式为 $R_{IS} = 10\lg(\bar{I}_B / \bar{S})$. 对 5G 系统而言, 研究导频性能一般需涉及导频污染

[9]. 这里的同导小区污染度 R_{IS} 越高, 表示同导小区对本小区导频的负面影响越严重, 也就意味着导频污染越明显. 类似地, 信干噪比也是评估导频性能的一项重要指标. 在已知噪声的平均功率 \bar{P}_n 时, 由式(4)和(5)可得出总体信干噪比 $R_{SIN} = \bar{S} / (\bar{I}_B + \bar{P}_n)$.

4 仿真结果与分析

本仿真的输入参数大部分来自对应标准(包括 IMT-A 和 5G 标准[2][10]). 仿真设定的小区半径 $R=200$ m, 载波频率位于 2.4 GHz 附近, 系统带宽 2 MHz, 平均上行发射功率 8 dBm, 路径损耗指数 $\gamma=2$, 阴影衰落标准差 $\sigma_S=7$ dB, 频谱效率衰减度 $\mu=0.8$, 热噪声强度设为 -180 dBm/Hz. 对于标准中尚未明确的参数, 则使用实际系统可选的一个合理值(或合理近似值)[11].

从理论上讲, 用户的增多会要求整体复用程度提高, 低复用因子的用户因此而缩减. 对应仿真输出的图 4 显示导频资源恒定时, 一定区间内各种复用因子对应的用户数. 随着横坐标增大, 1/27 复用的曲线与横轴重合, 1/9 复用的曲线加速递减, 1/3 复用的曲线加速递增, 全复用的曲线匀速递增. 它们表达的含义是: 在这个用户区间内, 全复用和 1/27 复用的权重不受用户量影响, 其中 1/27 复用因子不被使用; 而 1/9 复用正在逐步被 1/3 复用所取代, 其目的是以适应不断增大的用户容量需求. 这样的变化趋势和预期相符. 同理, 总用户量在其它区间增大时, 亦会出现高复用因子逐渐取代相邻的低复用因子的情况, 同时其它复用因子的权重保持不变.

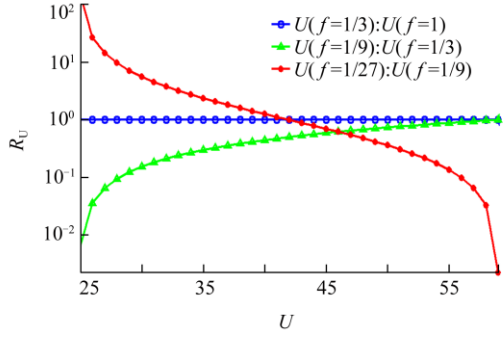


图5 相邻复用因子 f 分配的用户数之比(导频数 256)

正是由于相邻的两个复用因子存在取代/被取代的用户区间, 本研究在不同用户量下将相邻的两个复用因子作用用户数的比较. 图5的横轴对应一段用户区间, 可以看出在这段区间里, 由于靠近小区中心的全复用和 $1/3$ 用户群不变, 它们的比值 $U(f=1/3):U(f=1)$ 维持稳定, 另外两个复用因子中, $1/9$ 的复用程度略高, 因此在 $U(f=1/3)$ 占比稳定的情形下 $U(f=1/9):U(f=1/3)$ 的图线随用户的增多而稳步上升, 表示 $1/9$ 复用的权重不断增大; 而 $1/27$ 的复用程度最低, 因此其应用集中在低用户量的情形, $U(f=1/27):U(f=1/9)$ 的比值随用户的增多而迅速递减直至零. 可以预期当用户量继续增大时, $1/9$ 复用与其相邻的 $1/3$ 复用将此消彼长, $U(f=1/9):U(f=1/3)$ 的单调性将改增为减.

同导小区污染度在不同的复用程度下有不同的变化规律. 全复用是高复用程度的代表, 图6(a)显

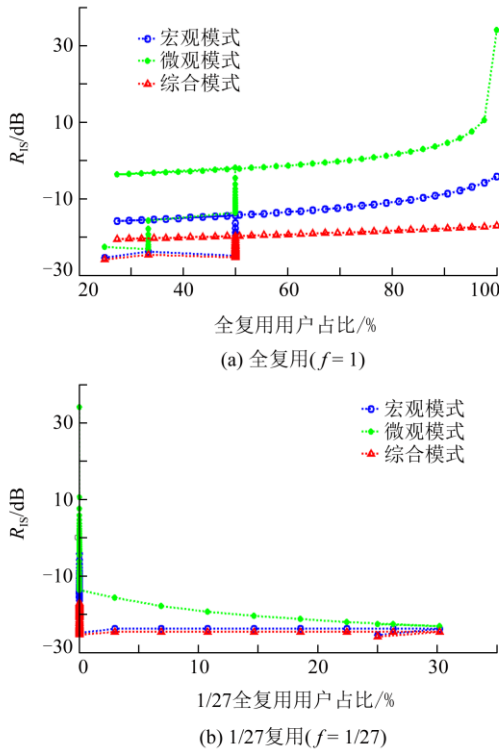


图6 不同复用因子对应的同导小区污染度(导频数 64)

示其占比越高, 对导频的负面影响越大; $1/27$ 复用是低复用程度的代表, 图6(b)显示其占比越高, 对导频的负面影响越小(或保持稳定). 两图的共同点是均体现出综合模式的优势, 它比单纯利用宏观或微观模式带来的信号污染更轻.

图7是小区边缘信噪比的仿真输出. 可以看出对任何复用模式而言, 用户数的增大总体上带来信噪比的降低, 这与理论预期相符. 同时, 综合模式的性能在信噪比指标上要优于单纯的宏观或微观模式. 用户量较小时, 综合模式相较于微观模式的优势明显一些; 用户量较大时, 综合模式相较于宏观模式的优势更明显. 图7也从另一个方面说明, 在保证小区边缘用户通信质量的条件下, 综合模式具有承载更多用户的能力.

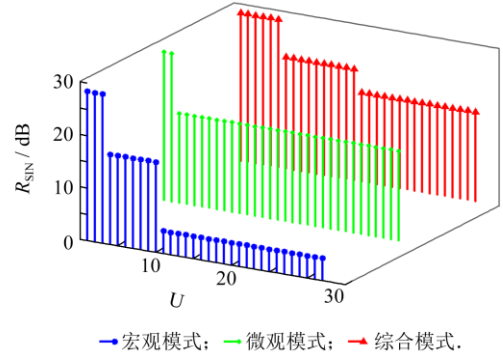


图7 不同复用模式下小区边缘信噪比(导频数 32)

5 结语

传统意义上的导频复用设计及其性能分析通常只从宏观维度进行, 该维度以小区为导频因子的最小应用单元; 本文引入了微观维度, 并对二阶和三阶微观复用机制作了具体的描述. 与宏观复用相反, 微观复用中导频因子的最小应用单元只是小区中的部分区域, 对此本研究以环区代替扇区的方式对小区进行划分, 相当于将用户终端的导频复用因子和无线传输距离关联起来. 这种微观模型与三扇区方式相比, 在增加导频复用调节力(复用弹性)的同时提升了数据的总体发送效率.

另一方面, 本研究在引入微观复用的基础上采取双维度并进的方式来规划导频复用. 相较于单一的宏观或微观维度, 双维度进一步增加了导频复用的调节精度, 更容易使复用效果接近理论最优. 同时双维度复用的同导小区污染度更低, 特别是能为小区边缘用户带来更高的信噪比.

总之, 将宏观与微观两个维度相结合, 对导频复用的性能有提升作用. 它既可发掘额外的系统容

量,又能在一定程度上保障小区用户特别是边缘用户的通信质量.因此在 5G 及后续的通信环境中,该复用模式提供了一种高效利用导频资源的方案,具有一定的现实意义.

参 考 文 献

- [1] 郭俊强,李成.移动通信[M].北京:北京大学出版社,2008.
- [2] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKÖLD J. 4G, LTE-advanced pro and the road to 5G[M]. 3rd Edition. Singapore: Elsevier, 2016.
- [3] 李建东,郭梯云,邬国扬.移动通信[M].4版.西安:西安电子科技大学出版社,2006.
- [4] 张佳佳,陈辉,王建刚,等.双圈均匀圆阵互耦和位置误差的联合校正[J].华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(8): 11-17.
- [5] 高翟.移动通信[M].武汉:华中科技大学出版社,2014.
- [6] GAO D, ZHU X, HUANG Y. Multiple division soft pilot reuse in massive MIMO cellular networks[C]// Proc of Information Communication and Management. Hatfield: IEEE, 2016: 187-192.
- [7] SOHN J, YOON S W, MOON J. On reusing pilots among interfering cells in massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(12): 8092-8104.
- [8] ZHU X, WANG Z, QIAN C, et al. Soft pilot reuse and multicell block diagonalization precoding for massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(5): 3285-3298.
- [9] HUA Y K, CHANG W. Time shifted pilots scheme for full-duplex massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 3022-3026.
- [10] LUO F, ZHANG J. Signal processing for 5G: algorithms and implementations[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.
- [11] 王映民,孙韶辉,高秋彬.5G 传输关键技术[M].北京:电子工业出版社,2017.